

# Ispitivanje otpornosti na plošno habanje 3D ispisanih ispitnih tijela iz akrilonitril/butadien/stirena postupkom taložnog očvršćivanja

## Testing the abrasion resistance of 3D printed test specimens made of acrylonitrile/butadiene/styrene by fused deposition modeling

*Znanstveni rad / Scientific paper*

Suzana Kutnjak-Mravlinčić<sup>1,\*</sup>, Sanja Ercegović Ražić<sup>1</sup>, Ana Sutlović<sup>1</sup>, Damir Godec<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, Prilaz baruna Filipovića 28a, 10000 Zagreb, Hrvatska

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, 10000 Zagreb, Hrvatska

\*Korespondencija: suzana.kutnjak-mravlincic@ttf.unizg.hr

### Sažetak

Postupci aditivne proizvodnje značajni su u razvoju suvremene proizvodnje stoga se provode mnoga istraživanja kako bi se utvrdila ili poboljšala svojstva 3D ispisanih tvorevina u skladu sa željenom primjenom. U radu je ispitana otpornost na habanje ispitnih tijela izrađenih iz akrilonitril/butadien/stirena (ABS) postupkom taložnog očvršćivanja (e. *Fused Deposition Modeling* – FDM) s ciljanom primjenom izrade potpetica cipela ili donjišta obuće. Ispitivanje je provedeno postupkom nahabavanja prema Martindaleu na 3D ispisanim ABS ispitnim tijelima obojenim disperznim bojilima postupkom iscrpljivanja i 3D ispisanim ispitnim tijelima bojenim u masi originalnog ABS polimera. Prema normi HRN EN ISO 12947-3:2008. Određivanje otpornosti na habanje metodom po Martindaleu: Određivanje gubitka mase, u rezultatima su prikazani gubitak mase u % i promjena debljine ispitnog tijela u %. Otpornost na habanje ispitana je na podlogama različite finoće kojima su simulirane vanjske i unutrašnje površine u skladu s ciljanom primjenom. Odabrano je šest habajućih podloga i za svaku podlogu ispitana su tri ispitna tijela. Rezultati ispitivanja pokazali su veću otpornost na habanje ispitnih tijela bojanih u masi (original ABS polimer u boji) u odnosu na ispitna tijela naknadno bojana disperznim bojilima.

**Ključne riječi:** taložno očvršćivanje; 3D ispis; akrilonitril/butadien/stiren; otpornost na habanje; donjište obuće

### Abstract

Additive manufacturing processes are of great importance for the development of modern production, which is why much research is being carried out to determine or improve the properties of 3D printed products depending on the desired application. In this work, the abrasion resistance of acrylonitrile/butadiene/styrene (ABS) test specimens was investigated using fused deposition modeling (FDM) for the production of shoe heels or shoe bottoms. The test was performed using the Martindale wear method on 3D-printed ABS test specimens colored with disperse dyes in the depletion process and on 3D printed test specimens colored in the mass of the original ABS polymer. In accordance with HRN EN ISO 12947-3:2008 Determination of abrasion resistance using the Martindale method: determination of mass loss, the results show the mass loss in % and the change in thickness of the test specimen in %. Abrasion resistance was tested on substrates of varying fineness, with the outer and inner surfaces

simulated according to the intended application. Six abrasive substrates were selected and three test specimens were tested for each substrate. The results of the test showed a higher abrasion resistance of the test specimens painted in the mass (original ABS polymer in color) compared to the test specimens subsequently painted with dispersion paints.

**Keywords:** fused deposition modeling; 3D printing; acrylonitrile/butadiene/styrene; abrasion resistance; shoe sole

## 1. Uvod

Postupak taložnog očvršćivanja (FDM), jedan od postupaka aditivne proizvodnje (e. *Additive Manufacturing* – AM), koji omogućava brzu izradu prototipova ili malih serija uz veću fleksibilnost u odnosu na tradicionalne proizvodne procese. Prednost AM procesa je u izradi predmeta u jednom koraku, izravno iz računalnog CAD modela (e. *computer-aided design* – CAD) bez uporabe dodatnih alata [1, 2, 3]. Postupak FDM ubraja se u ključne napredne proizvodne tehnologije (e. *Key enabling technologies* – KET) te predstavlja jednu od najčešće korištenih tehnika za izradu prototipa i personaliziranu proizvodnju [4, 5]. Postoji veći broj materijala primjenjivih u postupku FDM, a neki od njih su akrilonitril/butadien/stiren (ABS), polikarbonat (PC), mješavine akrilonitril/butadien/stirena i polikarbonata (ABS/PC), polilaktid (PLA), poli(metil-metakrilat) PMMA, poliamid (PA), polieterimid (PEI) i dr. [6, 7]. Jedan od najčešće korištenih materijala u izradi 3D ispisanih predmeta različitih primjena je ABS, zbog dimenzijske stabilnosti i niske temperature staklastog prijelaza te lijepog i sjajnog izgleda [8]. ABS je plastomerni amorfni polimer sastavljen od polimerizirajućeg stirena, akrilonitrila i polibutadiena i općenito ima dobru savojnu žilavost pri sniženoj temperaturi, zadovoljavajuću krutost i dimenzijsku točnost, sjajnu površinu te sposobnost izvođenja funkcionalnih ispitivanja dijelova [9, 10].

Primjena AM postupaka u sektoru obuće za izradu cjelovitih modela obuće ili pojedinih dijelova poput potplata ili visokih potpetica postaje sve značajnija [11-14]. Cipele ili njeni dijelovi izrađeni FDM postupkom više nisu novost, već predstavljaju hibridnu fuziju tradicionalne obuće i inovativne tehnologije 3D ispisa [15-18]. Primjena AM u obućarstvu može se svrstati u tri segmenta: 3D ispis pojedinih dijelova obuće kao što su npr. đonovi, potpetice, ukrasni i/ili funkcionalni detalji,

3D ispis cjelovitih modela jednostavnih ili složenih geometrija te 3D ispis ugradbenih dijelova, npr. uložnih tabanica [11, 18].

U posljednjim desetljećima provedena su brojna znanstvena istraživanja koja su dala veliku količinu podataka o utjecaju parametara 3D ispisa postupkom FDM na mehanička svojstva objekata, kao što je savojna i/ili rastezna čvrstoća [19-22].

Prema dostupnoj literaturi evidentan je mali broj radova posvećen ispitivanju otpornosti na habanje materijala za aditivnu proizvodnju. Opsežna istraživanja vezan uz izradu prototipova potpetica primjenom 3D ispisa i njihova karakterizacija provedena su u doktorskom radu [23], a dio istraživanja prikazan je u znanstvenom radu objavljenom je u međunarodnom časopisu [24].

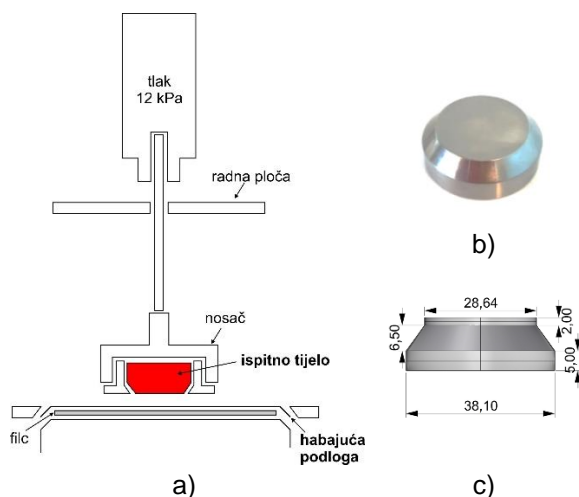
## 2. Eksperimentalni dio

### 2.1. Akrilonitril/butadien/stiren polimer

ABS je polimer koji se koristio za 3D ispis ispitnih tijela (proizvođač MakerBot, MakerBot Industries, New York, USA). Polimer dolazi u obliku filameta promjera 1,75 mm, mase namotka 1 kg, a za potrebe istraživanja pripremljena su ispitna tijela iz crvenog (e. *true red*) filameta i neobojenog (e. *natural*). Ispitna tijela 3D ispisana iz neobojenog ABS-a prije habanja bojana su disperznim bojom C.I. Disperse Red 15 postupkom iscrpljenja kupelji [24, 25].

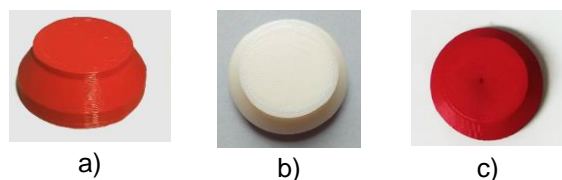
### 2.2. 3D ispis ispitnih tijela

Ispitna tijela izrađena su od ABS-a na stolnom 3D pisaču koji radi na načelima FDM postupka. Za provedbu ispitivanja otpornosti na habanje, prema nosaču ispitnog tijela habalice po Martindaleu (slika 1a i 1b) i specifikaciji dimenzija navedenih u normi ( $\varnothing 38,1 \pm 0,05 \times \varnothing 28,65 \pm 0,05$  mm) [26], u računalnom programu *Rhinoceros 5* modeliran je CAD model ispitnog tijela (slika 1c), s dodatkom od 2 mm zbog provedbe ispitivanja.



**Slika 1.** Ispitna tijela za habanje: a) shema habajuće glave s pripremljenim ispitnim tijelom b) nosač ispitnog tijela i c) CAD model ispitnog tijela [24].

Na stolnom 3D pisaču, MakerBot Replicator 2X (MakerBot Industries, USA), ispisana su ispitna tijela bojana u masi iz crvenog ABS-a (slika 2a) i ispitna tijela iz neobojenog ABS-a za naknadno bojenje vidljiva na slici 2b. Primjer obojenog ispitnog tijela disperznim bojilom C.I. Disperse Red 15 prikazan je na slici 2c.



**Slika 2.** 3D ispisana ispitna tijela za habanje: a) i b) bojeno u masi iz original crvenog i neobojenog ABS-a i c) obojeno disperznim bojilom [24].

Parametri 3D ispisa ABS ispitnih tijela bojanih u masi i naknadno bojanih navedeni su u tablici 1.

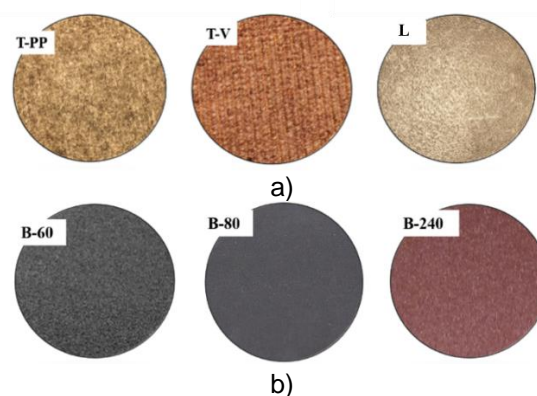
**Tablica 1.** Parametri 3D ispisa ispitnih tijela.

Parametri 3D ispisa	Vrijednost
Debljina sloja ispisa	0,20 mm
Gustoća ispune	40 %
Brzina izrade ispune	90 mm/s
Brzina izrade vanjske konture	40 mm/s
Broj vanjskih kontura	3
Tip ispune	saće
Temperatura mlaznice	230 °C

Temperatura radne podloge	110 °C
debljina sloja ispisa	0,20 mm

### 2.3. Habajuće podloge za ispitivanje

U skladu s ciljanom primjenom konačnog proizvoda odabrane su i habajuće podloge na kojima je provedeno ispitivanje u simuliranim uvjetima. Pritom su odabrane podloge za unutrašnje površine i podloge kojima su simulirane vanjske površine. Budući da se za unutrašnje uređenje većine radnih prostora primjenjuju podne obloge izrađene od prirodnih i umjetnih vlakana i polimera, odabrani su komercijalno dostupni uzorci podnih obloga: tepisona od polipropilenskih i vunениh vlakana (T-PP i T-V) i linoleum (L), koji su prikazani na slici 3a. Za ispitivanje otpornosti na habanje pri primjeni konačnog proizvoda na vanjskim površinama (npr. asfalta ili betona te vanjsko/unutarnjim površinama kao npr. keramičkim pločicama) kao habajuće sredstvo korišteni su brusni papiri različite granulacije (B-60, B-80, B-240) prikazani na slici 3b, a njihova specifikacija navedena je u tablici 2.



**Slika 3.** Uzorci habajućih podloga: a) tepison od polipropilenskih i vunениh vlakana (T-PP i T-V) i linoleum (L) i b) brusni papiri granulacije (B-60, B-80, B-240).

**Tablica 2.** Specifikacija habajućih podloga

Habajuća podloga	Oznaka	Debljina, mm
Polipropilenski tepison	T-PP	1,52
Vuneni tepison	T-V	4,80
Linoleum	L	1,28
Brusni papir 60	B-60	0,94
Brusni papir 80	B-80	0,74
Brusni papir 240	B-240	0,50

## 2.4. Ispitivanje otpornosti na habanje metodom plošnog habanja po Martindaleu

Ispitivanje otpornosti na habanje provedeno je na habalici po Martindaleu za ispitivanje otpornosti na habanje i sklonosti pilingu tvrtke Mesdan S.p.A., Italija model Martindale 2561E. Instrument se primjenjuje za ispitivanje plošnog tekstila i kože na plošno habanje te ispitivanje sklonosti plošnih tekstilnih materijala sklonosti pojavi pilinga [26]. Instrument ima 6 radnih mjesta, odnosno habajućih glava koje mijenjaju smjer kretanja (Lissajous krivulje kojima se determinira ispravan rad) ovisno o testu koji se provodi [26].

Ispitivanje otpornosti na habanje provodi se uz opterećenje od 9 kPa i 12 kPa [16], ovisno o vrsti i namjeni tekstilnog materijala sukladno normi HRN EN ISO 12947-3:2008. Ispitivanja se provode u uvjetima standardne atmosfere za ispitivanje (relativne vlažnosti  $H_R = 65 \pm 4 \%$  i temperature  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ). Prilikom iskazivanja rezultata potrebno je navesti uvjete ispitivanja uključujući primijenjeno sredstvo za habanje, postupak ispitivanja i ostale potrebne informacije.

Pripremljene habajuće podloge kružnog oblika promjera 140 mm postavljene su na radne ploče uređaja za habanje te su ispitna tijela postavljena u nosač (slika 4). Habanje je provedeno uz opterećenje od 12 kPa. Temeljni cilj ispitivanja je analiza otpornosti na habanje 3D ispisanih ABS ispitnih tijela s ciljem simulacije trošenja i stupnja istrošenosti funkcionalnih potplata (donjišta) cipela.

Ispitivanje je provedeno postupkom nahabavanja [25] 3D ispisanih ABS ispitnih tijela bojenih u masi i 3D ispisanih ABS ispitnih tijela naknadno bojenih, s ciljem utvrđivanja njihovih uporabnih svojstava.

Habanje materijala se provodi uz relativno pokretanje ispitnog tijela koji se ispituje spram sredstva za habanje pri čemu uslijed trenja dolazi do trošenja ispitivanog materijala određeno vrijeme, odnosno do određenog broja ciklusa. Ako se postupak habanja provodi do vidljivog oštećenja na plošnom proizvodu, govori se o postupku prohabavanja, a kao rezultat daje se broj ciklusa koji dovodi do vidljivog oštećenja ispitnog tijela. Rezultat ispitivanja iskazan je u vidu gubitka mase u % i promjene debljine ispitnog tijela u %. S obzirom na specifičnost ispitnog tijela u pogledu materijala i izgleda te namjene proizlazi potreba prilagodbe i modifikacija postupka ispitivanja,

prvenstveno u pripremi i izradi specifičnih 3D ispisanih ispitnih tijela za ispitivanje (odlomak 2.2).



a)



b)

**Slika 4.** Ispitivanje otpornosti na habanje na habalici po Martindaleu: a) pripremljene habajuće podloge i ispitna tijela i b) ispitna tijela po završetku ispitivanja.

Tijekom ispitivanja otpornosti na habanja 3D ispisanih ispitnih tijela iz ABS-a praćen je gubitak mase (prema izrazu 1) i promjena debljine (prema izrazu 2) habanog dijela ispitnog tijela.

$$\Delta m = \frac{m_{\text{ciklus}} - m_{\text{početna}}}{m_{\text{početna}}} * 100 [\%] \quad (1)$$

$$\Delta d = \frac{d_{\text{ciklus}} - d_{\text{početna}}}{d_{\text{početna}}} * 100 [\%] \quad (2)$$

gdje su:  $\Delta m$  [g] - promjena mase habajućeg ispitnog tijela,  $m_{\text{ciklus}}$  [g] - masa ispitnog tijela nakon ciklusa,  $m_{\text{početna}}$  [g] - početna masa ispitnog tijela,  $\Delta d$  [mm] - promjena debljine habajućeg ispitnog tijela,  $d_{\text{ciklus}}$  [mm] - debljina ispitnog tijela nakon ciklusa i  $d_{\text{početna}}$  [mm] - početna debljina ispitnog tijela.

## 3. Rezultati i diskusija

S ciljem provjere funkcionalizacije prototipova, ispitivanje otpornosti obojenih 3D tiskanih ispitnih




tijela na habanje provedeno je na šest podloga različite strukture. Time je osigurana simulacija ispitivanja otpornosti na habanje na unutrašnjim i vanjskim podlogama, a koja je bitna s obzirom na potencijalnu primjenu u proizvodnji obuće.

Za svaku habajuću podlogu ispitano je tri ispitnih tijela te je ukupno ispitano 36 ispitnih tijela. Pri analizi otpornosti na habanje praćenih izmjera; gubitka mase i promjene debljine, kao vrijednost za analizu uzeta je srednja vrijednost ispitnih tijela. Radi bolje preglednosti i uočavanja značajnijih razlika u tablicama rezultata prikazane su i snimke površinske strukture habanih ispitnih tijela.




### 3.1. Rezultati ispitivanja otpornosti na habanje ispitnih tijela bojenih u masi

U tablici 3 i 4 prikazane su srednje vrijednosti rezultata gubitka mase ( $\Delta m$ ), promjene debljina ( $\Delta d$ ) ispitnih tijela i izgled površinske strukture ispitanih ispitnih tijela bojenih u masi.

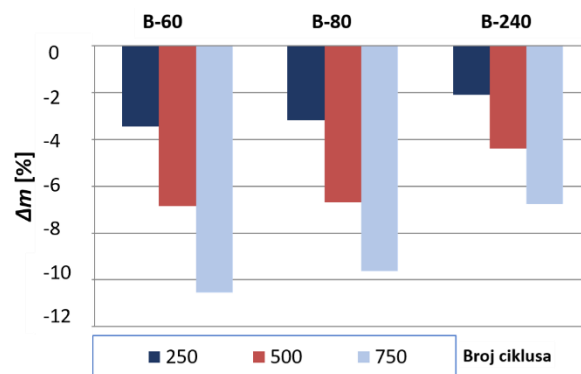
**Tablica 3.** Rezultati ispitivanja ispitnih tijela bojenih u masi na habajućim podlogama za vanjske podloge.

Uvjet / parametar	Broj ciklusa habanja		
	750	750	750
	Habajuća podloga		
	B-60	B-80	B-240
$\Delta m$ [%]	-10,55	-9,62	-6,76
$\Delta d$ [%]	-10,81	-9,88	-5,85
Izgled površine			

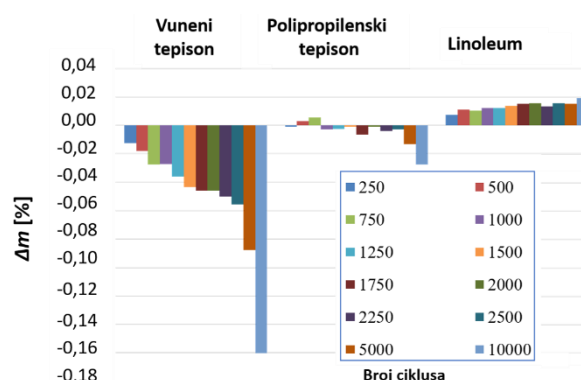
**Tablica 4.** Rezultati ispitivanja ispitnih tijela bojenih u masi na habajućim podlogama za unutrašnje podloge.

Uvjet / parametar	Broj ciklusa habanja		
	10 000	10 000	10 000
	Habajuća podloga		
	T-PP	T-V	L
$\Delta m$ [%]	-0,03	-0,16	0,02
$\Delta d$ [%]	-0,15	-0,72	-0,44
Izgled površine			

Na slikama 5 i 6 prikazani su dijagrami promjene mase za sve habajuće podloge prema provedenim ciklusima habanja za ispitna tijela bojana u masi.



**Slika 5.** Dijagram prikaza gubitka mase ispitnih tijela bojenih u masi prema ciklusima za habajuće podloge B-60, B-80 i B-240.



**Figure 6.** Dijagram prikaza gubitka mase ispitnih tijela bojenih u masi prema ciklusima za habajuće podloge T-V, T-PP i L.

Usporedbom dobivenih rezultata u ovisnosti o habajućoj podlozi uočava se značajan utjecaj podloge na istrošenost ispitnog tijela (tablica 3). U prilog tomu idu rezultati dobiveni nakon habanja različitim habajućim sredstvima koja se primjenjuju kao vanjske podloge, gdje se pri istom broju ciklusa (750) promjena gubitka mase očituje od -6,76 do -10,55 %.

Suprotno tome, kod habajućih sredstava koji se primjenjuju kao unutarnje podne obloge promjene u vidu gubitka mase i kod 10 000 ciklusa pokazale su se gotovo nepromijenjene u odnosu na početnu masu, od -0,02 do -0,16 % (tablica 4). U prilog takvim rezultatima idu i izmjerene promjene debljina istrošenog dijela ispitnih tijela koje su u

potpunosti ovisne ili u skladu s habajućim sredstvom i kreću se za vanjske habajuće podloge od -5,85 do -10,81 %, a za unutarnje od -0,15 do -0,72 % (tablice 3 i 4).

Iz tablice 3 i dijagrama prikaza smanjenja debljine preko mase (slika 5) uočava se da najveći gubitak mase imaju ispitna tijela habana na podlozi B-60 (-10,55 %) i ispitna tijela habana na podlozi B-80 (-9,62 %), a koji je u ovisnosti s izgledom površine. Najveću promjenu u vidu smanjenja debljine ispitnih tijela, kod kojih se habanjem istrošila ili potrošila vanjska površina te dolazi do vidljive unutarnje ispune saća, također imaju ispitna tijela habana na podlozi B-60 (-10,81 %) i ispitna tijela habana na podlozi B-80 (-9,88 %). Kod ispitnih tijela habanih na podlozi B-240 također dolazi do znatnog gubitka mase (-6,76 %) i manjeg smanjenja debljine (-5,85 %) što je vidljivo u djelomičnoj pojavi unutarnje ispune saća ispitnih tijela.

Iz tablice 4 vidljivo je da su ispitna tijela habana na tepison podlogama (T-PP i T-V) gotovo neprimjetnih promjena po izgledu vanjske površine, a gubitak mase je minimalan, kod ispitnih tijela habanih na podlozi T-PP iznosi svega -0,03 %, a kod ispitnih tijela habanih na podlozi T-P iznosi svega -0,16 %.

Kod ispitnih tijela habanih na linoleum podlozi poslije 10 000 ciklusa uočava se minimalno povećanje mase (+0,02 %) što govori da su se u površinsku strukturu ispitnih tijela tijekom habanja djelomično ugradili fragmenti habajuće podloge, vidljivo na slici 6, iako je na kraju testiranja i kod tih ispitnih tijela došlo do minimalnog smanjenja debljine od -0,44 % (tablica 4). Iz navedenih rezultata uočljivo je da je otpornost na habanje značajno manja na brusnim habajućim podlogama kojima su simulirane vanjske površine u odnosu na tepison i linoleumu kao podloge unutrašnjih prostora.




Na temelju ovako dobivenih rezultata ispitivanja otpornosti na habanje primjenom unutarnjih podnih obloga može se zaključiti da ispitna tijela bojana u masi pokazuju odličnu otpornost na trošenje i njihova potencijalna primjena bi se pokazala opravdanom za izradu potpetica ili donjišta obuće. S druge strane rezultati dobiveni ispitivanjem otpornosti na trošenje u vanjskim

uvjetima pokazuju da je pri značajno manjem broju ciklusa (750) došlo do istrošenosti vanjskih slojeva ispitnih tijela što je i očekivano s obzirom na hrapavost takvih čvrstih podloga.




### 3.2. Rezultati ispitivanja otpornosti na habanje ispitnih tijela naknadno bojanih disperznim bojom

U tablicama 5 i 6 prikazane su srednje vrijednosti rezultata gubitka mase ( $\Delta m$ ), promjene debljina ( $\Delta d$ ) ispitnih tijela i izgled površinske strukture ispitanih ispitnih tijela naknadno bojanih disperznim bojom.

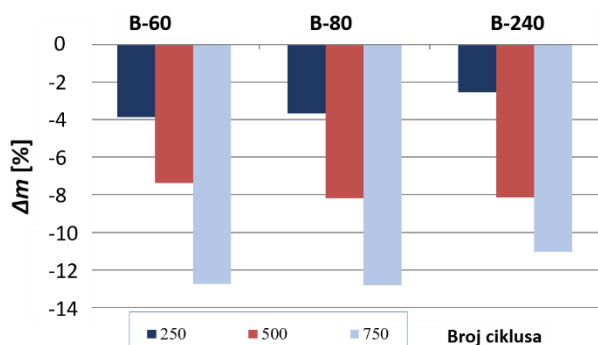
**Tablica 5.** Rezultati ispitivanja ispitnih tijela naknadno bojanih disperznim bojom na habajućim podlogama za vanjske podloge.

Uvjeti / parametri	Broj ciklusa habanja		
	750	750	750
	Habajuća podloga		
	B-60	B-80	B-240
$\Delta m$ [%]	-12,74	-12,81	-11,03
$\Delta d$ [%]	-10,79	-12,56	-6,52
Izgled površine			

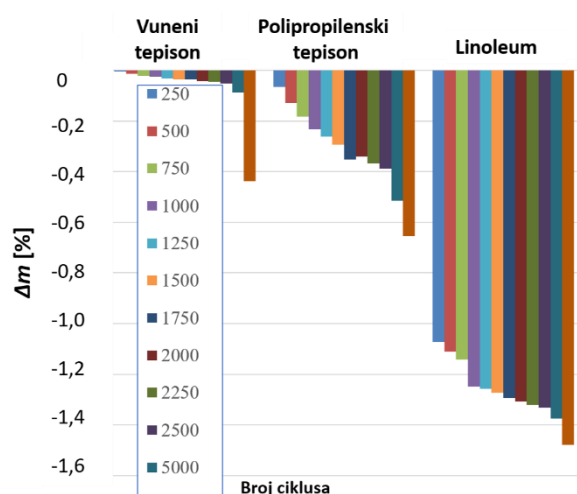
**Tablica 6.** Rezultati ispitivanja ispitnih tijela naknadno bojanih disperznim bojom na habajućim podlogama za unutrašnje podloge

Uvjet / parametar	Broj ciklusa habanja		
	10 000	10 000	10 000
	Habajuća podloga		
	T-PP	T-V	L
$\Delta m$ [%]	-0,65	-0,16	-1,48
$\Delta d$ [%]	-0,24	-1,03	-0,24
Izgled površine			

Na slikama 7 i 8 prikazani su dijagrami gubitka mase za sve habajuće podloge prema provedenim ciklusima habanja za ispitna tijela naknadno bojana disperznim bojom.



**Slika 7.** Dijagram prikaza gubitka mase ispitnih tijela bojenih disperznim bojilom prema ciklusima za habajuće podloge B-60, B-80 i B-240.



**Slika 8.** Dijagram prikaza gubitka mase ispitnih tijela bojenih disperznim bojilom prema ciklusima za habajuće podloge T-V, T-PP i L.

Usporedbom dobivenih rezultata u ovisnosti o habajućoj podlozi uočava se značajan utjecaj podloge na istrošenost ispitnog tijela (tablica 5). U prilog tomu idu rezultati dobiveni nakon habanja različitim habajućim sredstvima koja se primjenjuju kao vanjske podloge, gdje se pri istom broju ciklusa (750) promjena gubitka mase očituje od -11,03 do -12,81 %.

Suprotno tome kod habajućih sredstava koji se primjenjuju kao unutarnje podne obloge promjene u vidu gubitka mase i kod 10 000 ciklusa pokazale su se minimalne u odnosu na početnu masu, od -0,16 do -1,48 % (tablica 6). U prilog takvim rezultatima idu i izmjerene promjene debljina istrošenog dijela ispitnih tijela koje su u potpunosti ovisne ili u skladu s habajućim sredstvom i kreću se za vanjske habajuće podloge od -6,52 % do -

12,56 %, a za unutarnje od -0,24 % do -1,03 % (tablice 5 i 6).

Iz tablice rezultata 5 i dijagrama prikaza gubitka mase (slika 7) uočava se da najveći gubitak mase imaju ispitna tijela habana na podlozi SP-80 (-12,81 %) i ispitna tijela habana na podlozi SP-60 (-12,74 %), a koji je u ovisnosti s izgledom površine. Najveću promjenu gubitka debljine ispitnih tijela kod kojih se habanjem istrošila vanjska površina te dolazi do pojave unutarnje ispune saća također imaju ispitna tijela habana na podlozi B-80 (-12,56 %) i ispitna tijela habana na podlozi B-60 (-10,79 %). Kod ispitnih tijela habanih na podlozi B-240 također dolazi do značajnog gubitka mase (-11,03 %) i smanjenja debljine za -6,52 % što je vidljivo u djelomičnoj pojavi unutarnje ispune ispitnih tijela.

Iz tablice rezultata 6 vidljivo je da kod ispitnih tijela naknadno bojenih disperznim bojilima habanih na tepison i linoleum podlogama (T-PP, T-V i L) dolazi do većih gubitaka u masi i promjeni debljine u odnosu na rezultate od ispitnih tijela bojenih u masi. Gubitak mase kod ispitnih tijela habanih na podlozi T-PP iznosi -0,65 %, a smanjenje debljine iznosi -0,24 %. Kod ispitnih tijela habanih na podlozi T-V gubitak mase je -0,16 %, a smanjenje debljine iznosi -1,03 %.

Kod ispitnih tijela habanih na linoleum podlozi poslije 10 000 ciklusa uočava se gubitak mase od -1,48 % što je potpuno suprotno rezultatima ispitivanja ispitnih tijela bojenih u masi na istoj podlozi kod kojih dolazi do minimalnog povećanja mase. Smanjenje debljine iznosi minimalnih -0,24 %.

#### 4. Zaključak

Razvoj postupaka aditivne proizvodnje i primjena 3D ispisa u industriji obuće nudi nove proizvodne potencijale i mogućnosti, te promjenu tradicionalnog modela izrade obuće. U isto vrijeme omogućuje brži razvoj proizvoda, dizajn složenih geometrija bez potrebe za dodatnim alatima, prilagodbu dizajna specifičnim karakteristikama ili uvjetima, usklađivanje estetskih i ergonomskih zahtjeva, bržu izradu prototipa te bržu provjeru dizajnerskih i/ili funkcionalnih rješenja čime se utječe i na smanjenje troškova izrade. Ovisno o ciljanoj primjeni konačnog proizvoda provode se

opsežna istraživanja utjecaja mehaničkih svojstava za razvoj novih proizvoda. U ovom ispitivanju cilj provedbe analize otpornosti na habanja 3D ispisanih ABS ispitnih tijela postupkom FDM bio je provjeriti istrošenost donjišta obuće ili prototipova potpetica funkcionalnih cipela. Sukladno tome uzorci su ispitani na šest habajućih podloga različitih tekstura, a izbor podloga omogućuje simulaciju ispitivanja otpornosti na trošenje na unutarnjim i vanjskim površinama. Otpornost na habanje ispitana je na 3D ispisanim ispitnim tijelima iz ABS-a bojenim u masi (original ABS polimer u boji) i 3D ispisanim ispitnim tijelima iz ABS-a naknadno bojenim disperznim bojilom. Rezultati ispitivanja otpornosti istrošenosti pokazuju da su ispitna tijela bojana u masi (original ABS polimer u boji) otpornija na habanje u odnosu na ispitna tijela naknadno bojana disperznim bojilima u prosjeku za oko 10 %. Iako je prema rezultatima ispitivanja otpornosti na habanje na habajućim podlogama za unutrašnje prostore trošenost niska te se može preporučiti za donjišta obuće ili

potpetice funkcionalnih cipela, na istim površinama prilikom upotrebe dolazi do proklizavanja što bi moglo utjecati na nepraktičnost tijekom nošenja takvih cipela te se preporučuje dodavanje protukliznog sloja na dno potpetice. Kod primjene cipela s potpeticama načinjenim s ABS-om u vanjskim prostorima zbog slabe otpornosti na habanje i velike istrošenosti preporučuje se u postupku konstruiranja predvidjeti umetanje/dodavanje natpetnika od materijala kao i u klasičnim postupcima izrade ženskih cipela visokih potpetica ili oblikovati ABS natpetnik koji će se, nakon što se istroši, moći jednostavnim postupkom zamijeniti novim. Rezultati ovog istraživanja mogu značajno utjecati na dodanu vrijednost 3D ispisanih ABS tvorevina i njihovu primjenu u izradi prototipova donjišta obuće ili manjih limitiranih serija. Doprinos provedenih ispitivanja je moguća simulacija jednog koraka u realnim uvjetima, za koji se može pretpostaviti da odgovara jednom ciklusu habanja u laboratorijskim uvjetima.

---

## Literatura

- [1] Kruth J. P.: Progress in additive manufacturing and rapid prototyping, *Manufacturing Technology* **47** (1998) 2, 525-540
- [2] Berman B.: 3-D printing: The new industrial revolution, *Business Horizons* **55** (2012) 2, 155-162
- [3] Godec D. et al.: A Guide to Additive Manufacturing, Introduction to Additive Manufacturing, Springer Cham 2022, 1-43, ISBN 978-3-031-05862-2, <https://doi.org/10.1007/978-3-031-05863-9>
- [4] Ciffolilli A., Muscio A.: Industry 4.0: national and regional comparative advantages in key enabling technologies, *European Planning Studies* **26** (2018) 12, 2323-2343
- [5] Attoye S. et al.: Correlation between process parameters and mechanical properties in parts printed by the fused deposition modeling process, *Mechanics of Additive and Advanced Manufacturing* **8** (2019) 35-41
- [6] Jandyal A. et al.: 3D printing - A review of processes, materials and applications in industry 4.0, *Sustainable Operations and Computers* **3** (2022), 33-42
- [7] Mazzanti V. et al.: FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of their Mechanical Properties, *Polymers* **11** (2019) 7, 1-22
- [8] Perez T. et al.: Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials, *ASM International* **14** (2014), 343-353
- [9] Kulich D.M. et al.: Acrylonitrile–Butadiene–Styrene Polymers, *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2001, 174-201



- [10] Selvamani S. K. et al.: 3D Printing: Overview of ABS Evolvment, AIP Conference Proceedings **2059**, (2019)
- [11] Vanderploeg A. et al.: The application of 3D printing technology in the fashion industry, International Journal of Fashion Design, Technology and Education **10** (2017), 170-179
- [12] Gong T., Kang L.: Application Analysis of 3D Printing Technology in Design Field: Taking Shoe Design as an Example, Scientific Programming **2021** (2021), 1-8
- [13] Kutnjak-Mravlinčić S. et al.: Application of additive technology in footwear design, Book of Proceedings 8th Central European Conference on Fiber-grade Polymers, Chemical Fibers and Special Textiles, Dekanić, T., Tarbuk, A. (ur.). University of Zagreb Faculty of Textile Technology, Zagreb 2015, 201-206
- [14] Kutnjak-Mravlinčić S.: Design-driven additive manufacturing, Knowledge Platform for Transferring Research and Innovation in Footwear Manufacturin, Iași, Institutul Național de Inventică, Iași, 2018, 55-114
- [15] Gelaziene E., Milasiene D.: Influence of the Type of Plastic and Printing Technologies on the Compressive Behavior of 3D-Printed Heel Prototypes, Materials **16** (2023), 1-17
- [16] García-Dominguez A. et al.: Optimization Methodology for Additive Manufacturing of Customized Parts by Fused Deposition Modeling (FDM). Application to a Shoe Heel, Polymers **12** (2020), 1-30
- [17] Dong, G. et al.: Design of Shoe Soles Using Lattice Structures Fabricated by Additive Manufacturing. Proceedings of the Design Society International Conference on Engineering Design (2019) 1, 719-728
- [18] Kutnjak-Mravlinčić S. et al: Application of 3D printing from acrylonitrile/butadiene/styrene in the realization of prototypes of heels of women's, Tekstil **71** (2022) 1, 48-56
- [19] Travieso-Rodriguez, J.A. et al.: Mechanical properties of 3D-printing Polylactic acid parts subjected to bending stress and fatigue testing DOE -design of experiments ANOVA - analysis of variance, Metals, Special Issue Advances in Plastic Deformation Technologies (2019), 1-24
- [20] Kuznetsov, V.E. et al.: Hardware Factors Influencing Strength of Parts Obtained by Fused Filament Fabrication, Polymers **11** (2019), 1-27
- [21] Rankouhi, B. et al.: Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation, Journal of Failure Analysis and Prevention **16** (2016) 3, 467-481
- [22] Travieso-Rodriguez, J.A. et al.: Comparative study of the flexural properties of ABS, PLA and a PLA–wood composite manufactured through fused filament fabrication, Rapid Prototyping Journal **27** (2020) 1, 81-92
- [23] Kutnjak-Mravlinčić S.: Utjecaj parametara 3D ispisa postupkom taložnog očvršćivanja i geometrije šupljikavih struktura na svojstva 3D ispisanih proizvoda od akrilonitril/butadien/stirena, doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, Zagreb, Hrvatska, 2021
- [24] Kutnjak-Mravlinčić S. et al.: Innovative Development of Batch Dyed 3D Printed Acrylonitrile/Butadiene/Styrene Objects, Molecules **26** (2021) 21, 1-14
- [25] Kutnjak-Mravlinčić S. et al.: A. Determination the coloristic values of 3D objects printed from acrylonitrile/butadiene/styrene, In Proceedings of the VI Scientific-Vocational Conference Development Tendencies in the Textile Industry—Design, Technology, Management, Savanović, G., (Ed.). The College of Textile Design, Technology and Management, Beograd, Serbia, 2018, 101-105

[26] HRN EN ISO 12947-3:2008 Određivanje otpornosti na habanje metodom po Martindaleu:  
Određivanje gubitka mase

### **Zahvala**

Ovaj rad je financirala Hrvatska zaklada za znanost projektom Napredni tekstilni materijali ciljane modifikacije površine (ADVANCETEX) (Bischof, Sandra, HRZZ/IP-2013-11).